

# Tracking

Joany Manjarrés (TU Dresden)



Latin American alliance for  
Capacity building in Advanced physics  
**LA-CoNGA physics**



Cofinanciado por el  
programa Erasmus+  
de la Unión Europea





# Tracking

- ¿Qué es el tracking (o rastreo)?
  - Tracking es la reconstrucción de la trayectoria de partículas cargadas en un detector



# Tracking

- ¿Qué es el tracking (o rastreo)?
  - Tracking es la reconstrucción de la trayectoria de partículas cargadas en un detector
- ¿Para qué nos sirve reconstruir las trayectorias de las partículas?
- ¿Cómo reconstruimos las trayectorias de las partículas?
- ¿Cómo, usando trazas, identificamos partículas, medimos su carga y momentum?



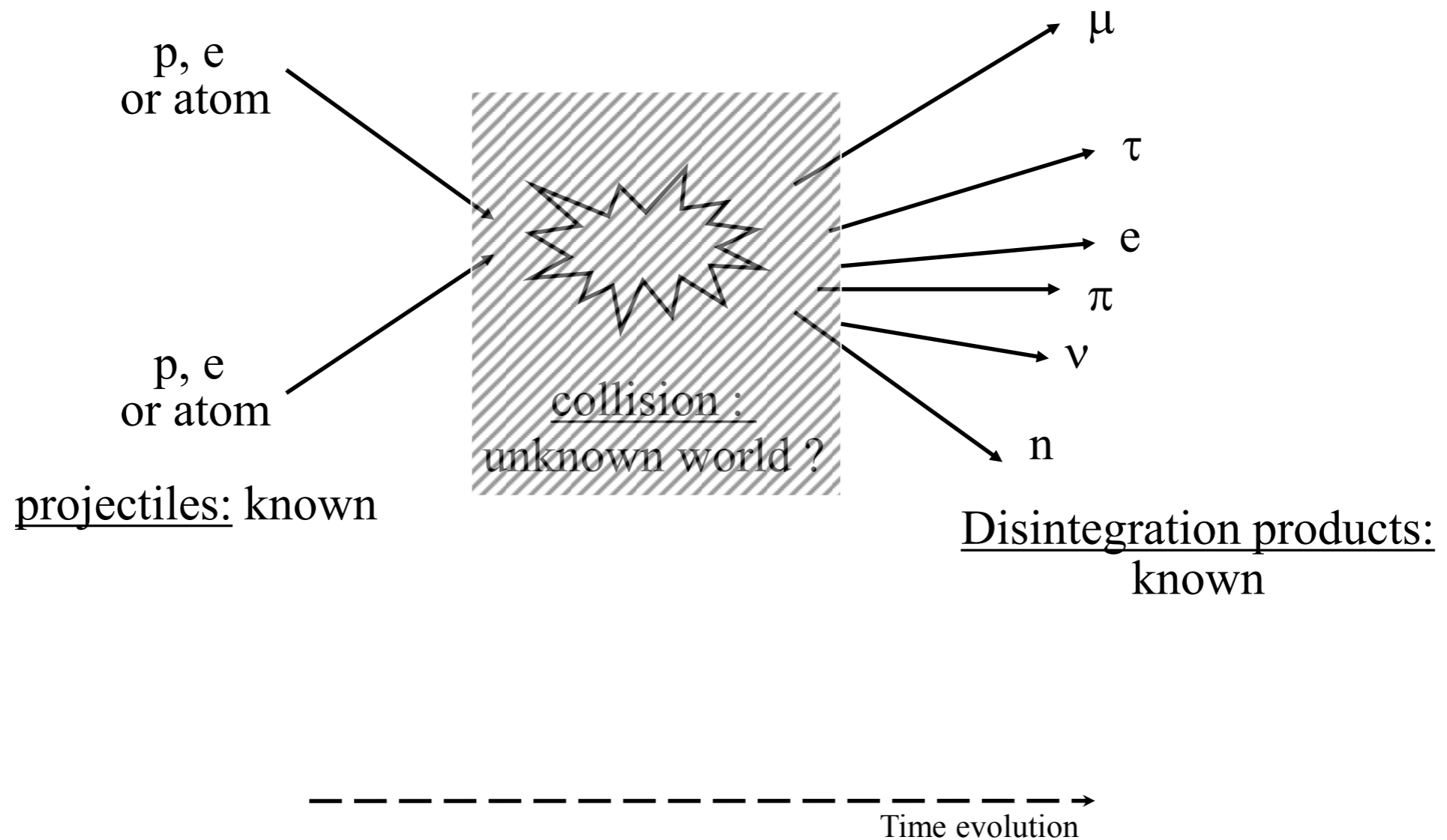
¿Para qué nos sirve reconstruir las trayectorias de las partículas?



# ¿Para que reconstruir trazas?

- En un experimento de física queremos conocer las partículas que atraviesan nuestro detector

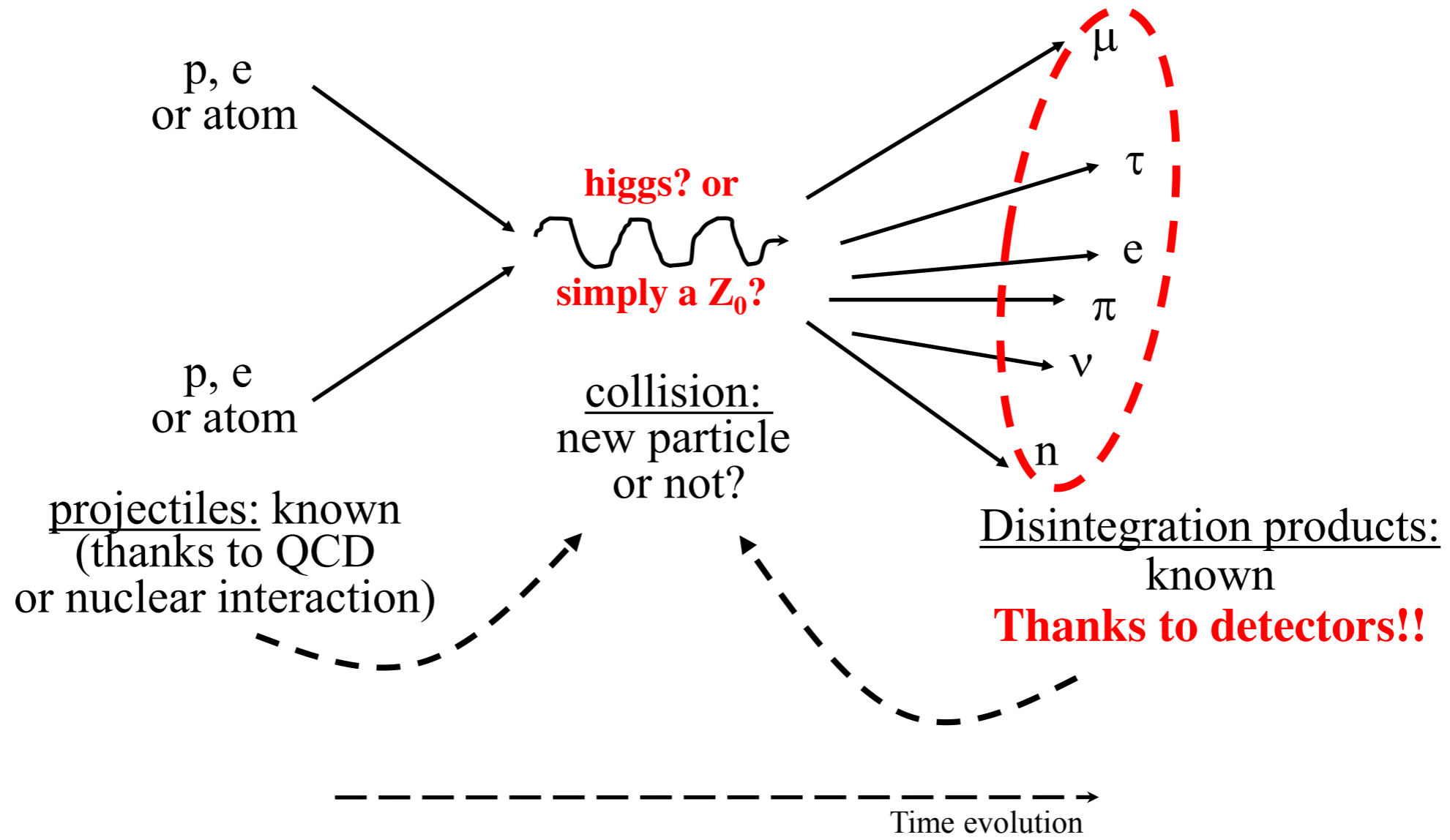
## Problematic (simplified)





# ¿Para que reconstruir trazas?

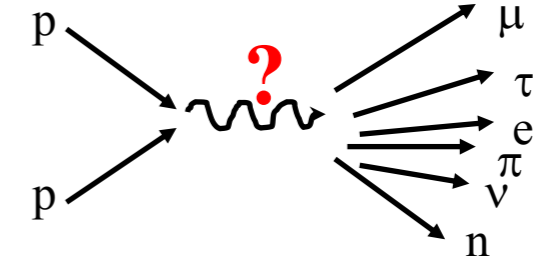
## Problematic (simplified)





# ¿Para que reconstruir trazas?

Goal: test a theory.  
Example of an analysis



**I would like to find (for example) a Higgs using its decay mode:**

$$p + p \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^{0*} \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- \quad (\text{in real life: } p+p \rightarrow H + \dots \rightarrow ZZ + \dots \rightarrow ee\mu\mu + \dots)$$

(higgs)

I should calculate:

$$m_H^2 = (E_{Z^0} + E_{Z^{0*}})^2 - (\vec{p}_{Z^0} + \vec{p}_{Z^{0*}})^2$$

For each  $Z^0$ , I should calculate (e.g. for  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ):

$$m_{Z^0}^2 = (E_{\mu^+} + E_{\mu^-})^2 - (\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-})^2$$

Also for a Higgs decaying in two gamma's :  $H \rightarrow \gamma\gamma$

In all cases, we should measure:

$E_{\mu^+}$ ,  $E_{\mu^-}$ , spatial momentum (i.e. tracks with their angular directions)



# ¿Qué queremos conocer de las partículas?

- Para las partículas necesito poder
  - medir la energía de estas partículas
  - medir la posición de las partículas (es decir, saber por donde pasó o si pasó)
  - medir la dirección de estas partículas
  - Identificar estas partículas (carga y masa)





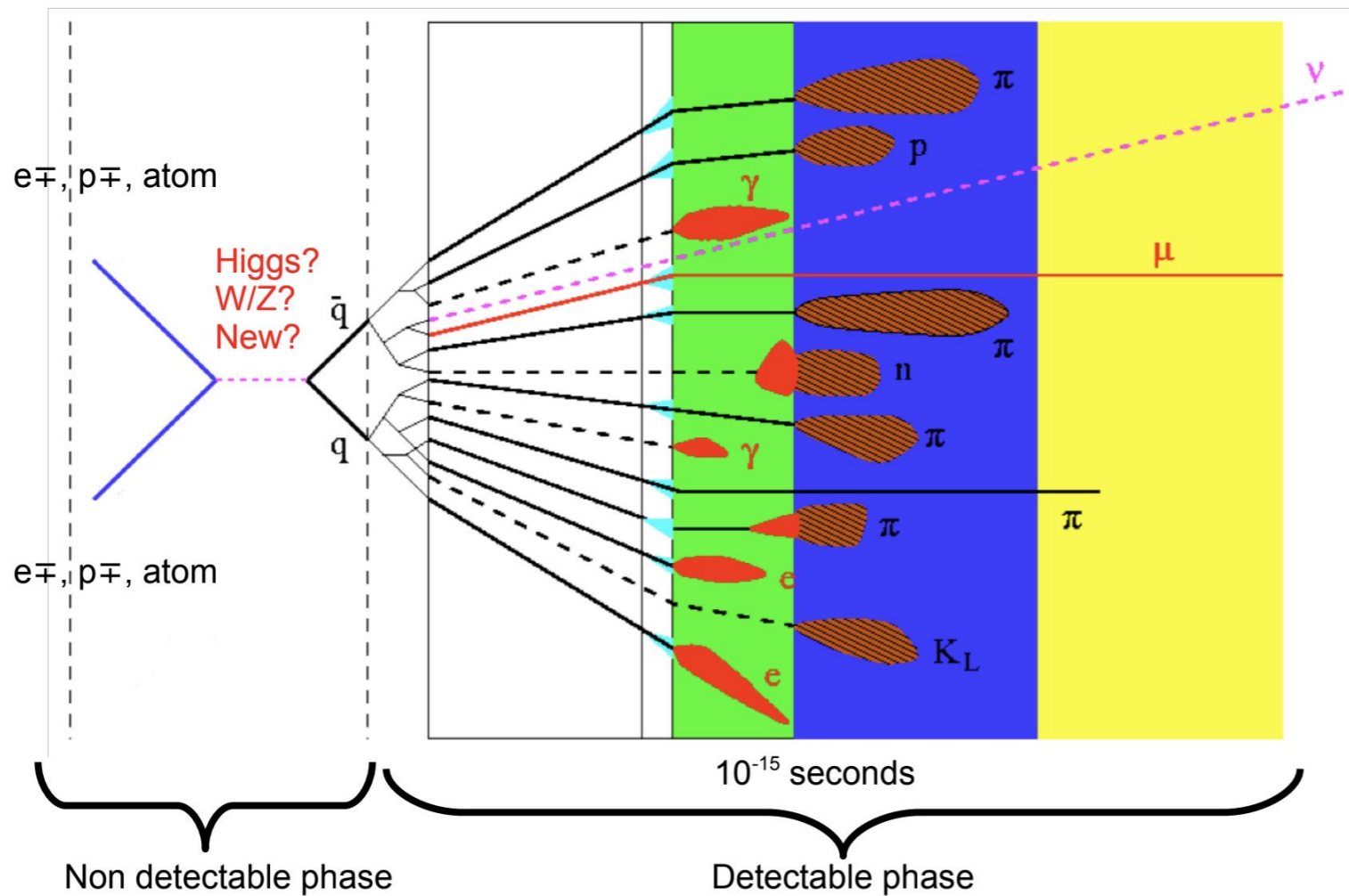
# ¿Cómo nos ayuda con eso el tracking?

- Tracking nos permite la reconstrucción de la trayectoria de **partículas cargadas estables** en un detector.
- Es una medida no destructiva.
- Usamos campos magnéticos para determinar el momento y la carga de la partícula.



# Partículas estables

- Solo podemos identificar particular con tiempo de vida largo



- Partículas inestables:
  - se identifican mediante la reconstrucción de las partículas estables que salen a partir de su desintegración.
- Partículas estables:
  - atraviesan el detector, y no se desintegran dentro de éste.
  - partículas cargadas:  $\pi^\pm$ ,  $k^\pm$ , muones, electrones y protones (y sus antipartículas).
  - partículas neutrales: fotones, neutrones,  $k^0$ .



¿Cómo reconstruimos las trayectorias de las partículas?

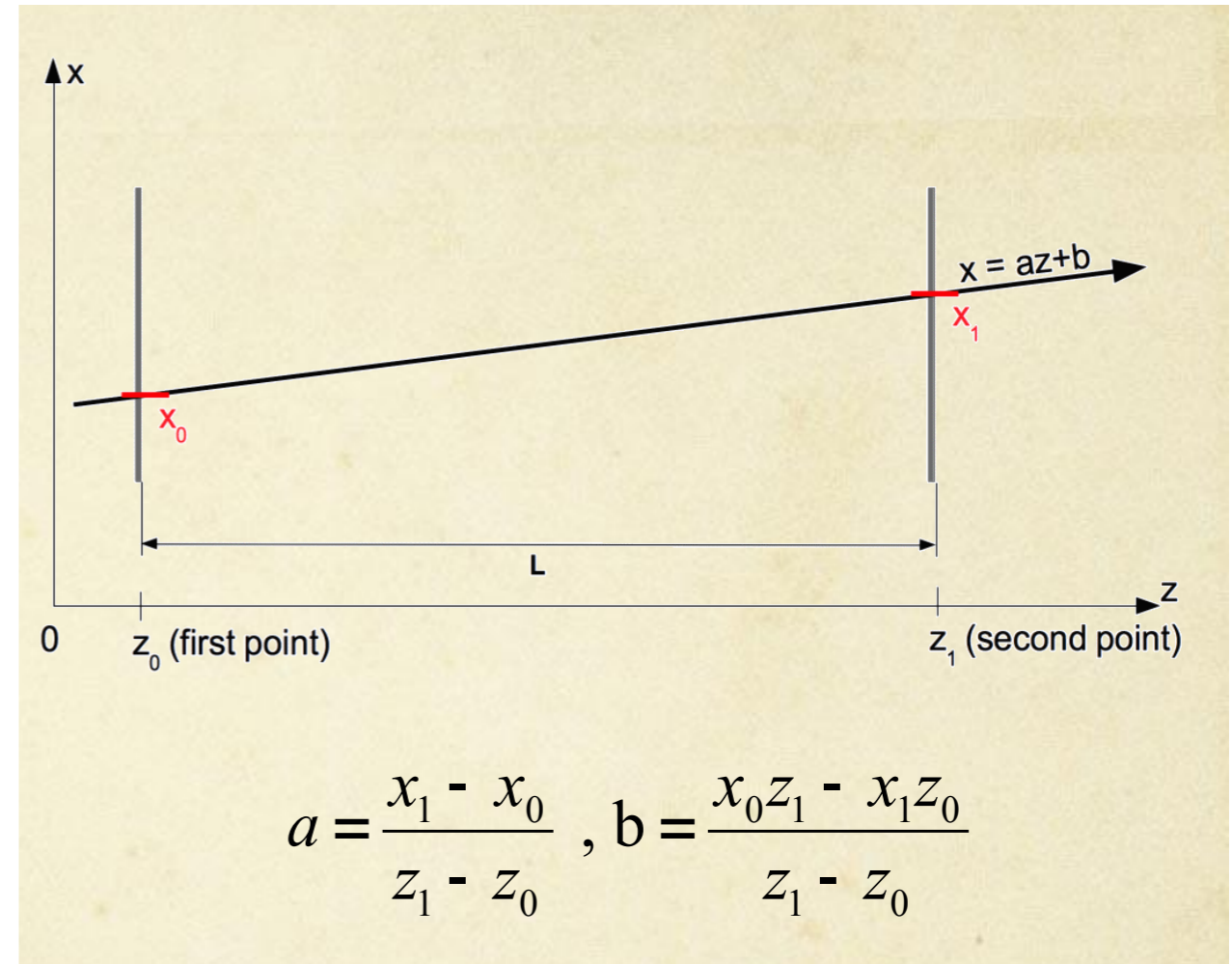


## Hipótesis:

- Dos sensores
  - posiciones perfectas
  - infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en línea recta
  - 2 parámetros (a,b)

## Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una línea recta
- No hay error!



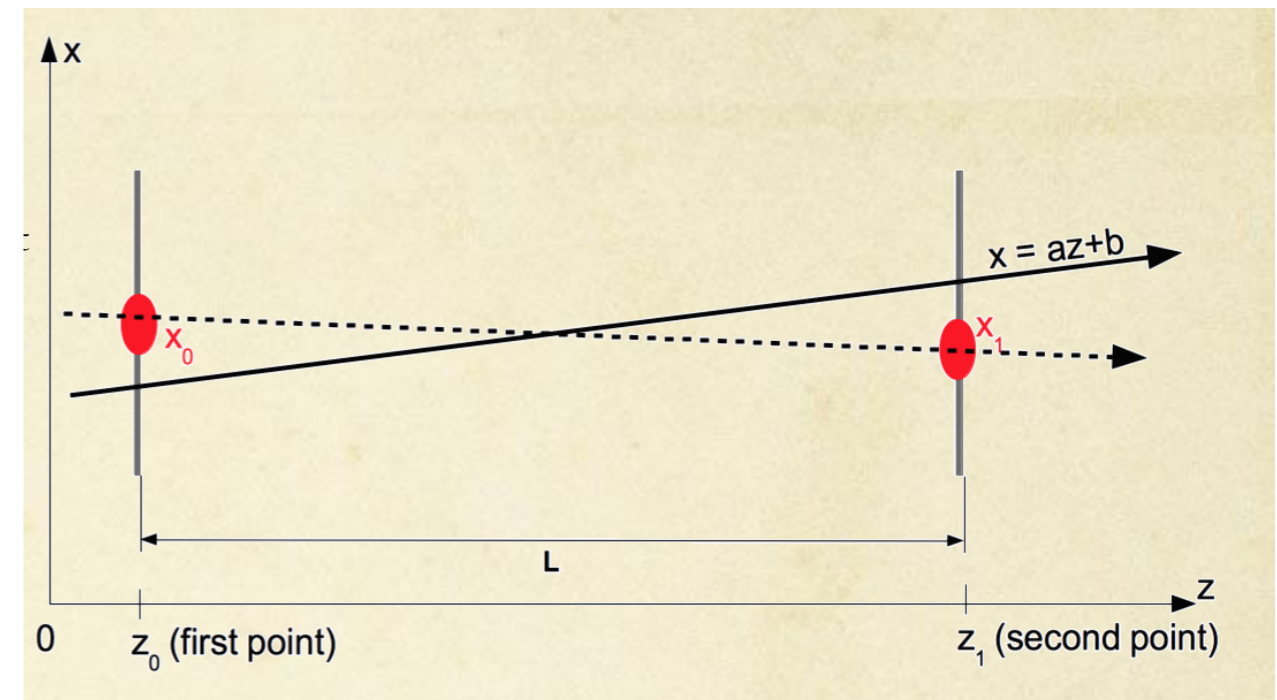


## Hipótesis:

- Dos sensores
  - posiciones con INCERTITUDES  $S_{det}$
  - infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en línea recta
  - 2 parámetros (a,b)

## Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una línea recta
- Incertitudes de la propagación de errores



$$a = \frac{x_1 - x_0}{z_1 - z_0}, \quad b = \frac{x_0 z_1 - x_1 z_0}{z_1 - z_0}$$

$$S_a = \frac{\sqrt{2}}{z_1 - z_0} S_{det}, \quad S_b = \frac{\sqrt{z_1^2 + z_0^2}}{z_1 - z_0} S_{det}$$

$$\text{COV}_{a,b} = - \frac{\sqrt{z_1 + z_0}}{z_1 - z_0} S_{det}$$



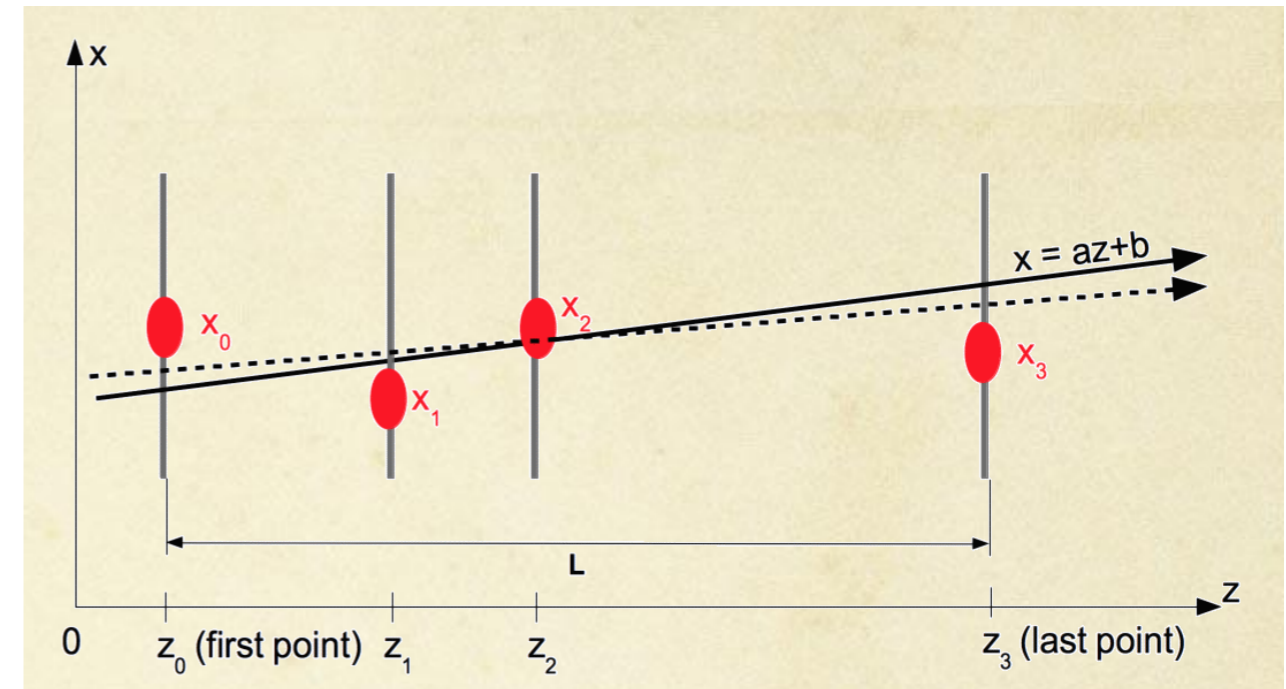
## Hipótesis:

- MAS de dos sensores
- posiciones con INCERTITUDES  $S_{\text{det}}$
- infinitamente delgado
- 1 partícula viajando en línea recta
- 2 parámetros (a,b)

## Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una línea recta
- Necesitamos un fit de mínimos cuadrados
- Necesitamos la matriz de covarianza de las mediciones (en este caso es diagonal)
- Incertidumbres por propagación de errores
- El detalle depende de la geometría

➔ Tanto la medida como las incertidumbres mejoran



$$a = \frac{S_1 S_{xz} - S_x S_z}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}, \quad b = \frac{S_x S_{z^2} - S_z S_{xz}}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

$$s_a^2 = \frac{S_1}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}, \quad s_b^2 = \frac{S_{z^2}}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$

$$\text{COV}_{a,b} = \frac{-S_z}{S_1 S_{z^2} - (S_z)^2}$$



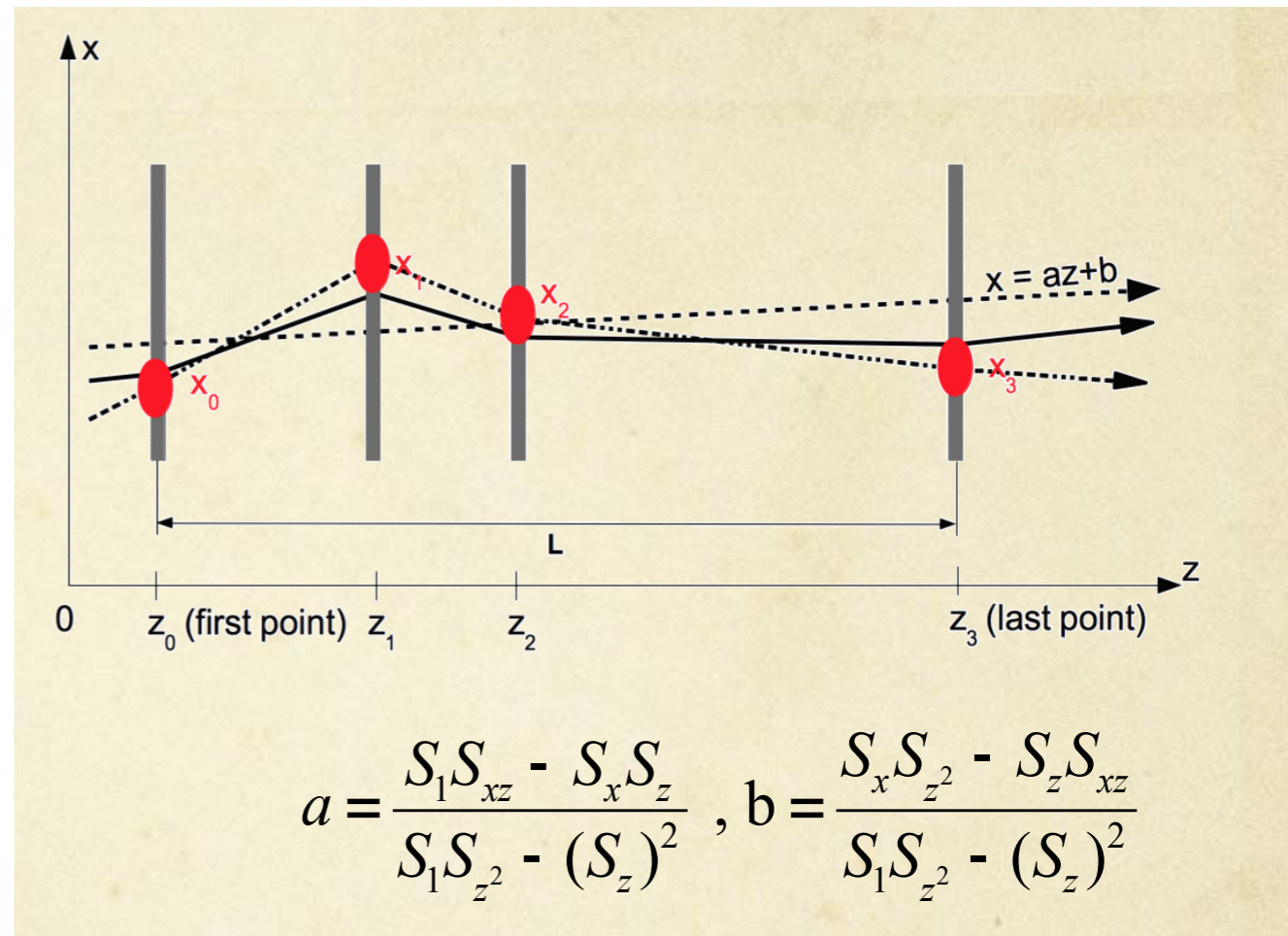
## Hipótesis:

- Más de dos sensores
  - posiciones con INCERTITUDES  $S_{det}$
  - Detector con algo de grosor (efectos físicos)
- 1 partícula viajando en línea recta
  - 2 parámetros (a,b)

## Estimación de los parámetros de la traza

- Asumiendo que la traza es una línea recta
  - Necesitamos un fit de mínimos cuadrados
  - Necesitamos la matriz de covarianza de las mediciones (en este caso tiene términos no diagonales)
- Incertidumbres por propagación de errores

➔ Ahora las incertitudes crecen!



### Expresión de la matriz covariante compleja

- correlación entre sensores
- Varias implementaciones posibles



# Tracking version RELOADED

## Hipótesis:

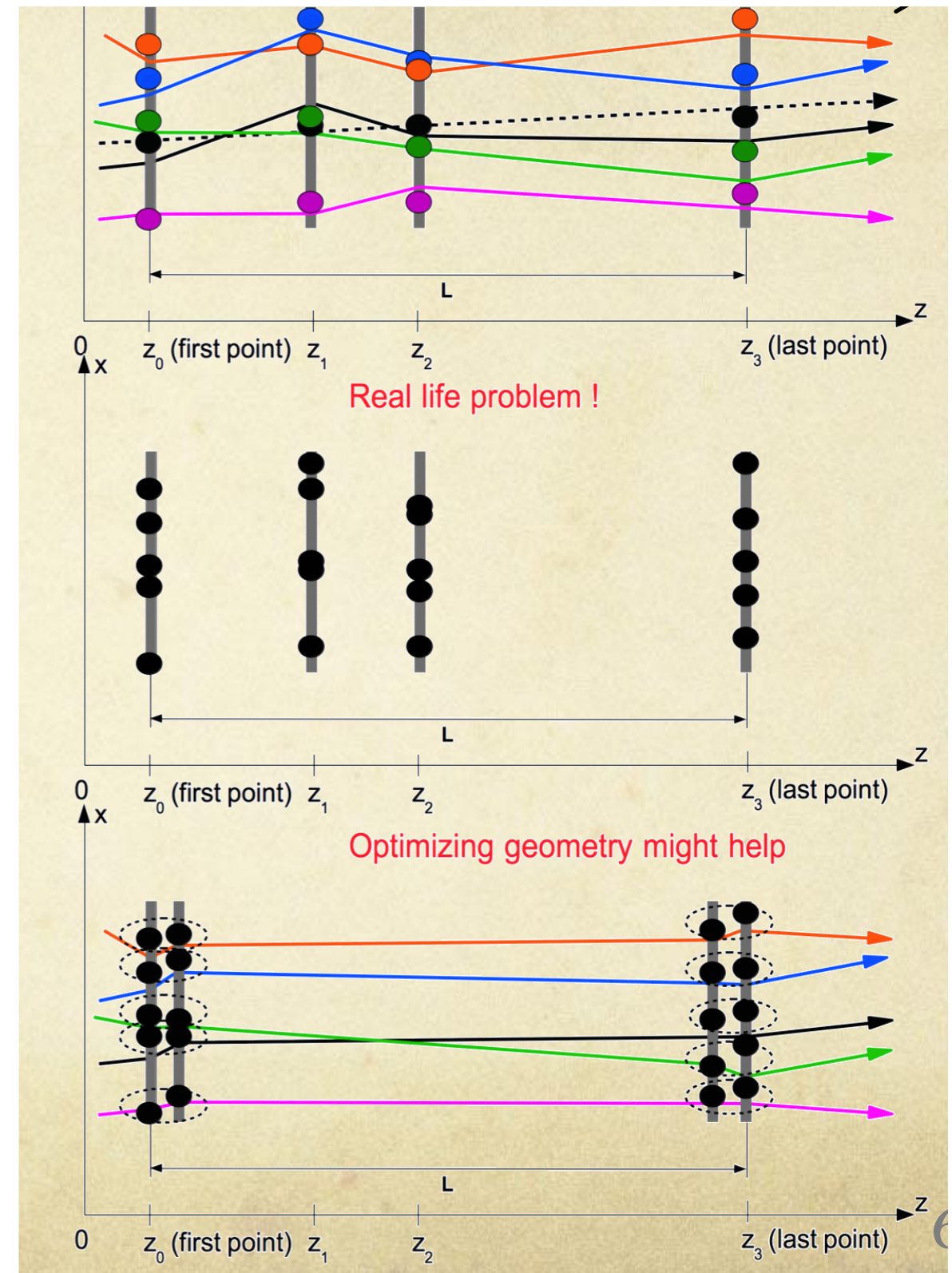
- Más de dos sensores
- posiciones con incertitudes  $S_{det}$
- detector con algo de grosor
- MUCHAS partículas viajando en línea recta
- 2 parámetros (a,b) por traza!
- dirección de la traza puede cambiar

## Nuevo paso = Encontrar la traza

- Saber cuales hits pertenecen a una traza
- Depende de la geometria

## Estimación de los parámetros de la traza

- Después de conseguir los hits
- Los errores están correlacionados

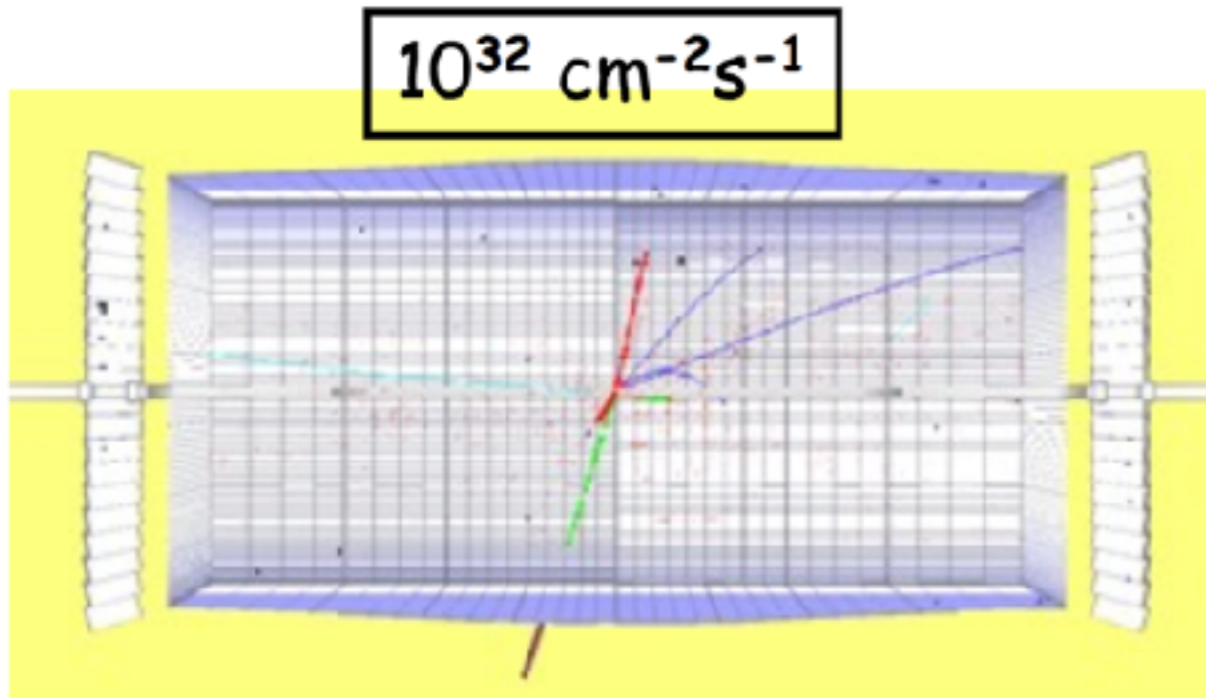






# Tracking en el LHC

Simulación de un  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$  con masa de  $M_H = 300$  GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

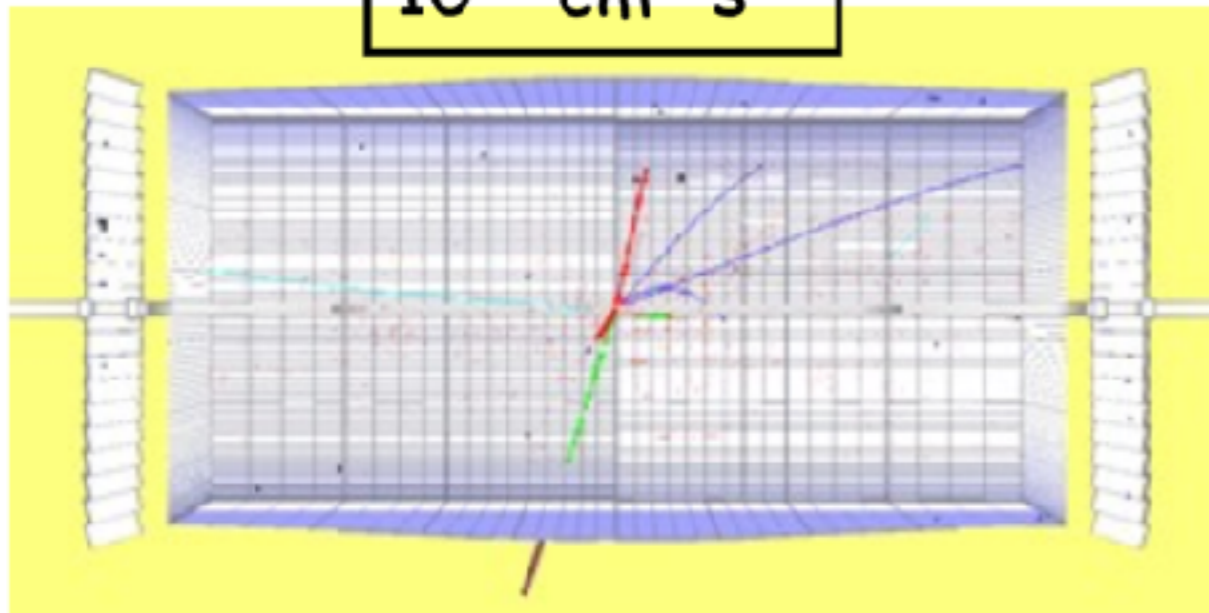




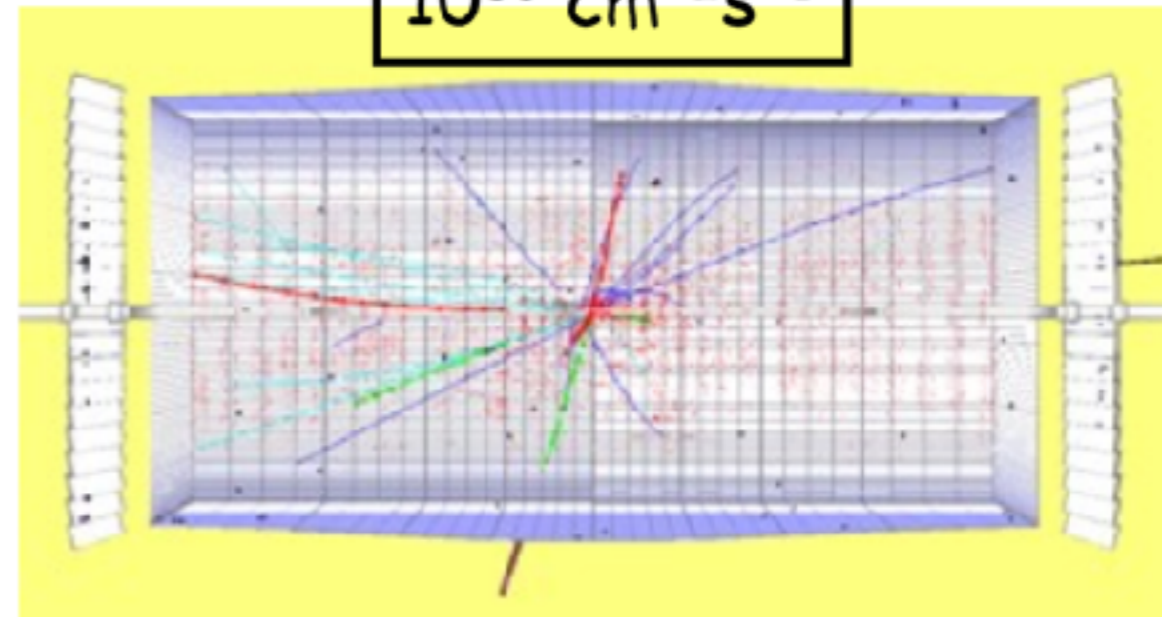
# Tracking en el LHC

Simulación de un  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$  con masa de  $M_H = 300$  GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

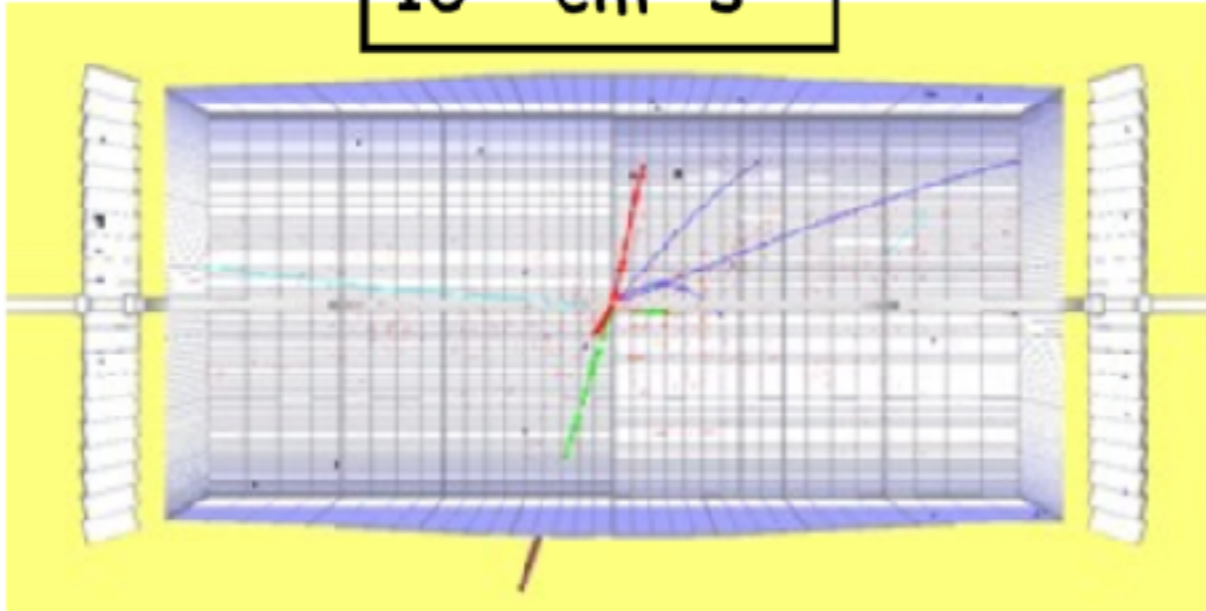




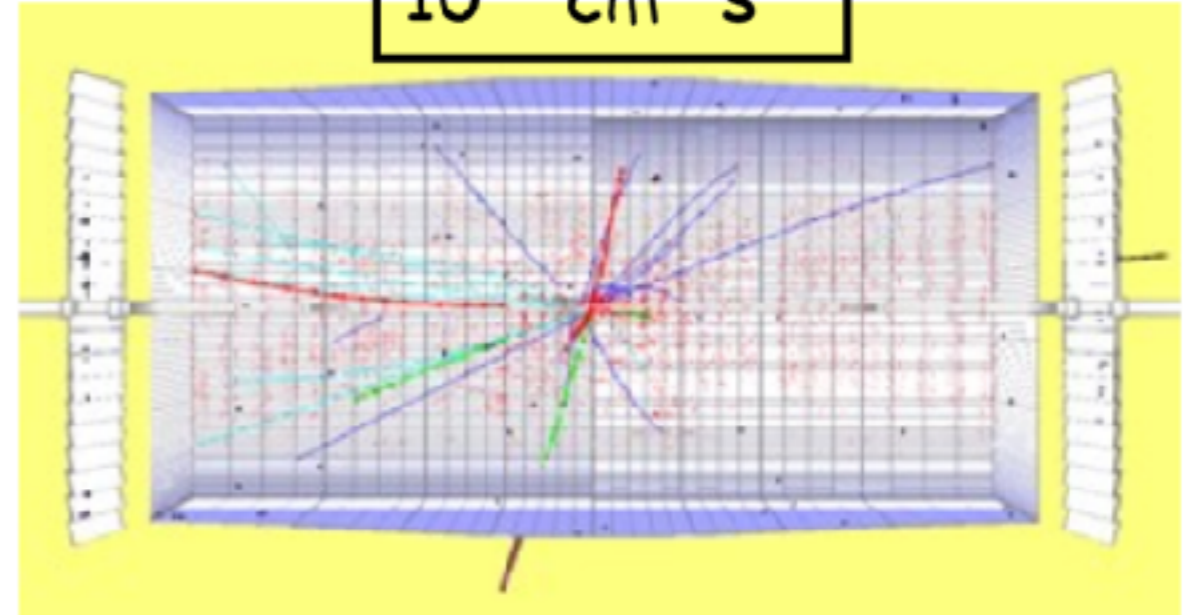
# Tracking en el LHC

Simulación de un  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$  con masa de  $M_H=300$  GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

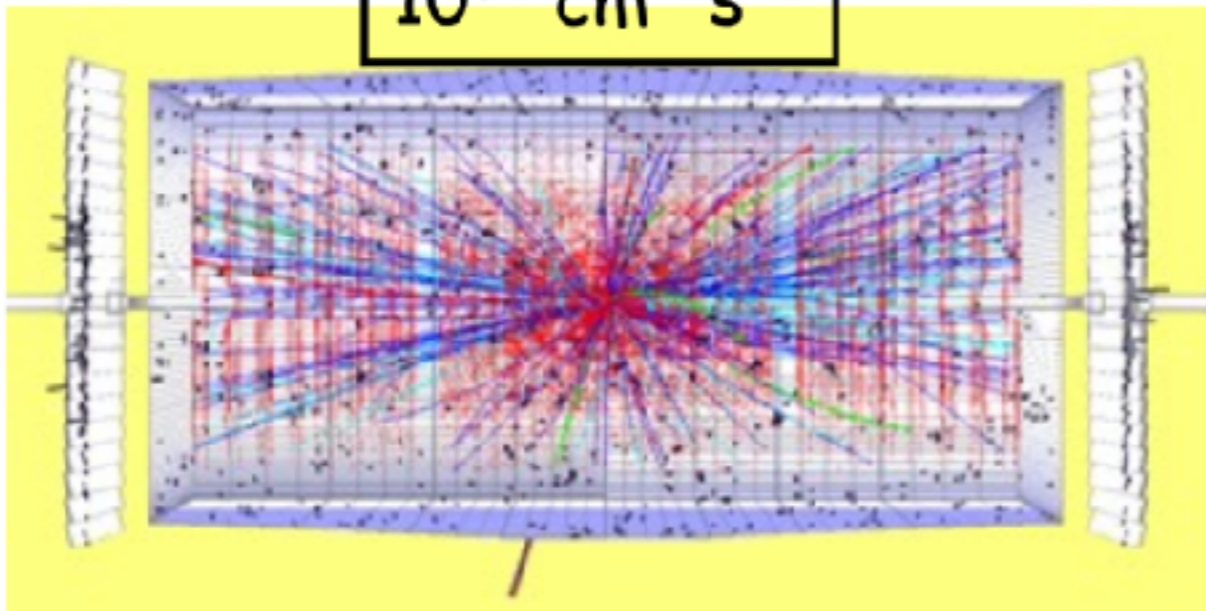
$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

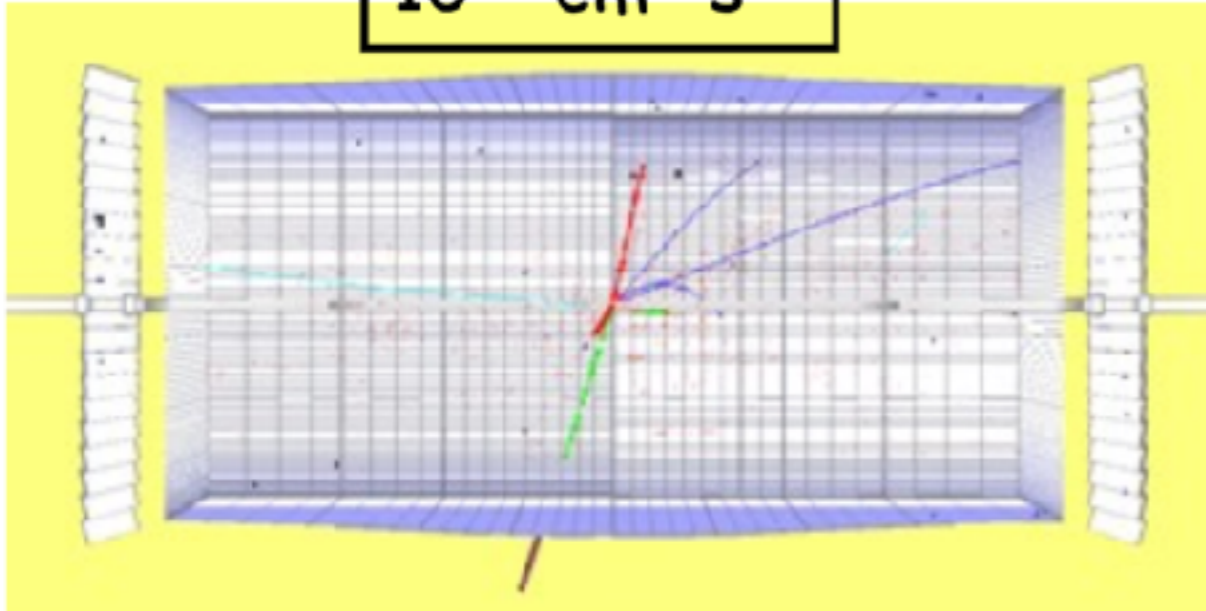




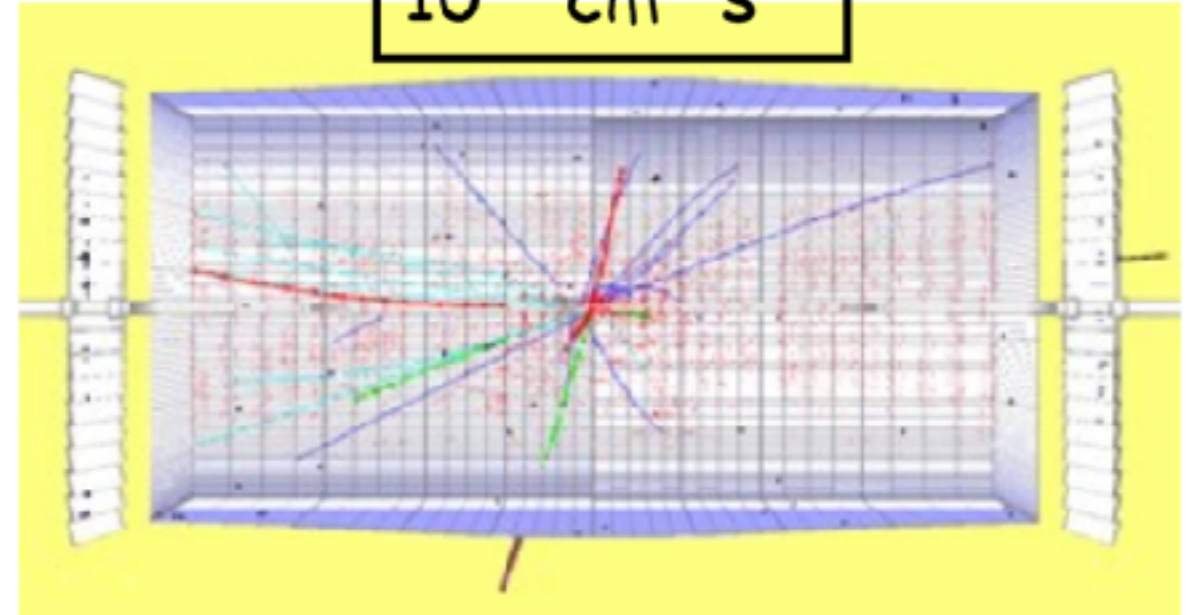
# Tracking en el LHC

Simulación de un  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$  con masa de  $M_H = 300$  GeV en el detector CMS y diferentes luminosidades

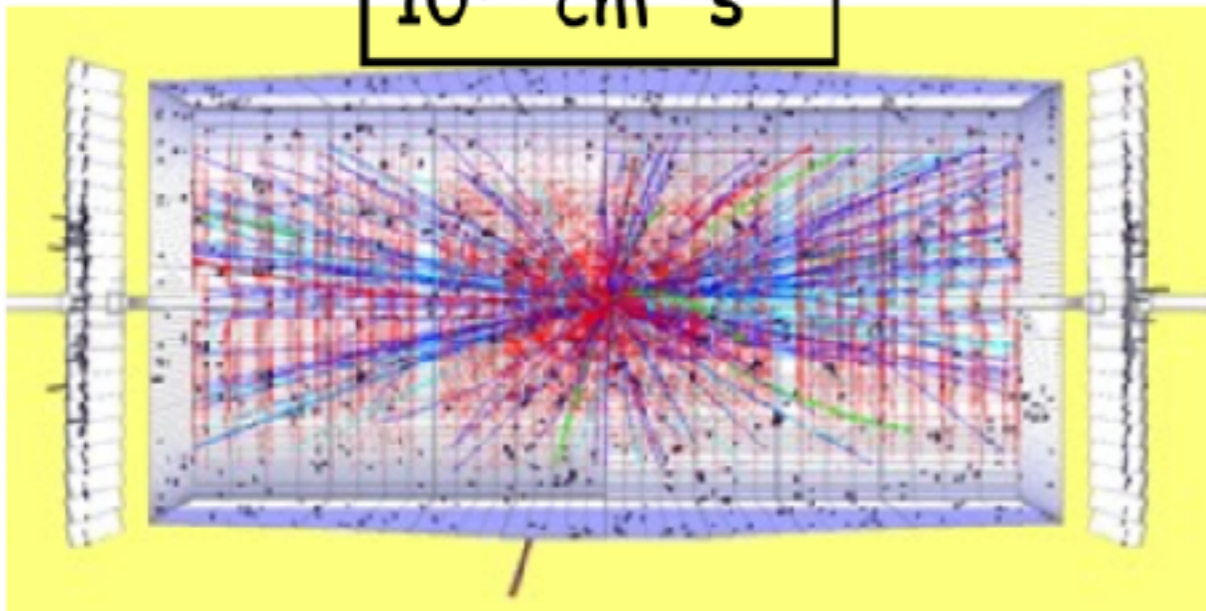
$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



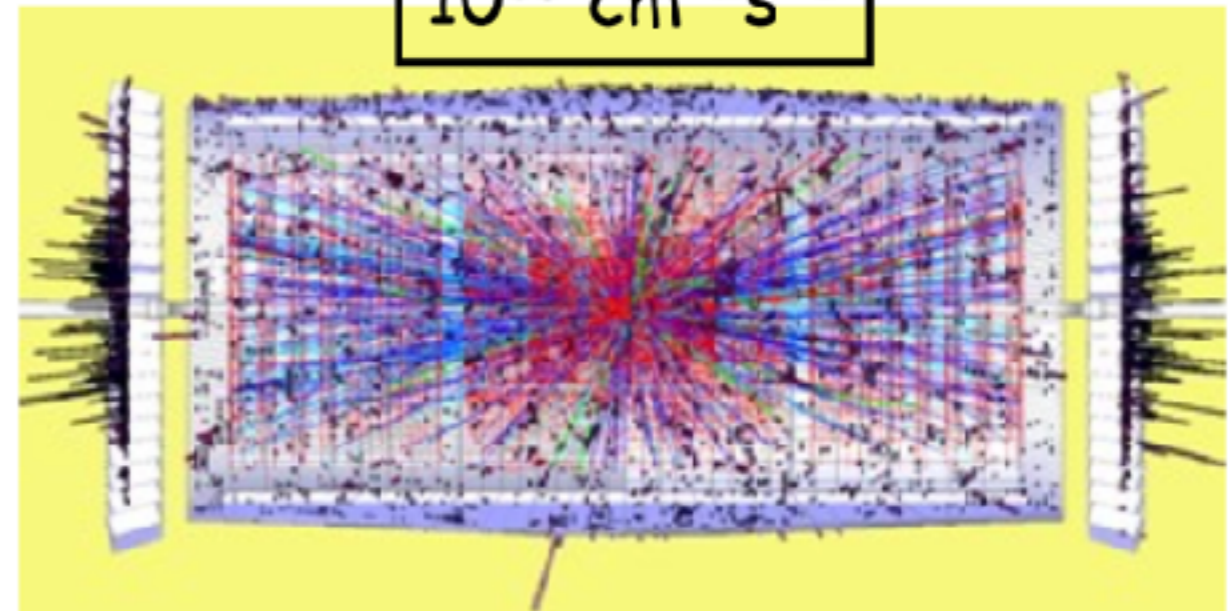
$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



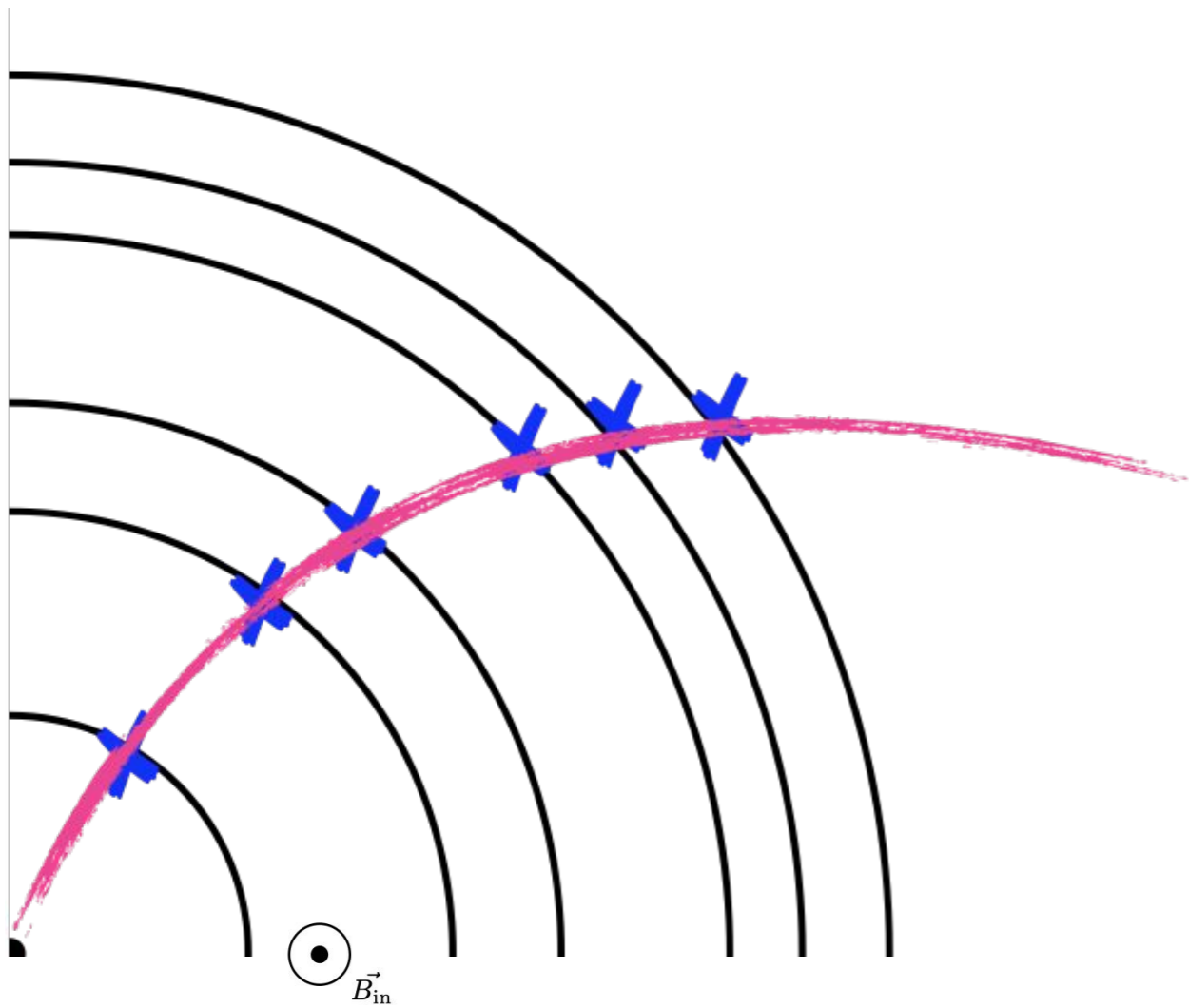
$10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



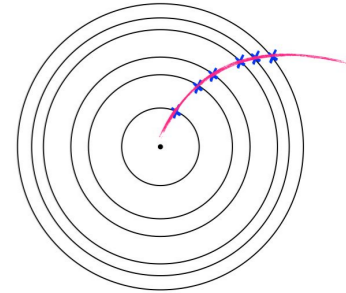


# ¿Cómo se generan los hits ?

- ¿Qué procesos de interacción de la **partícula-materia** debemos considerar?



Vista completa



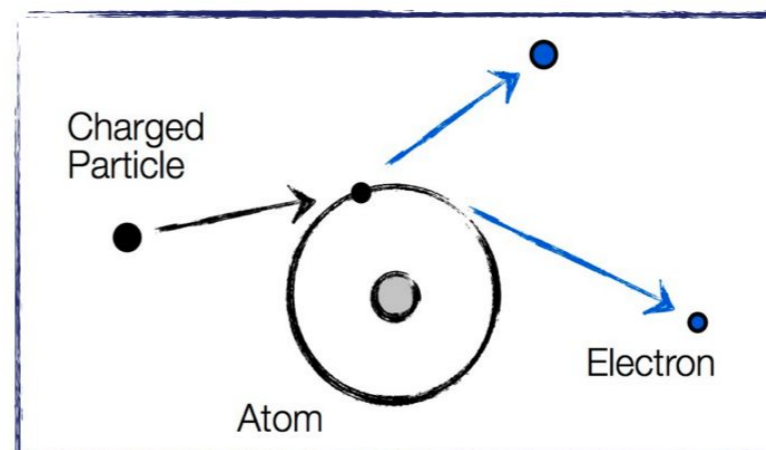
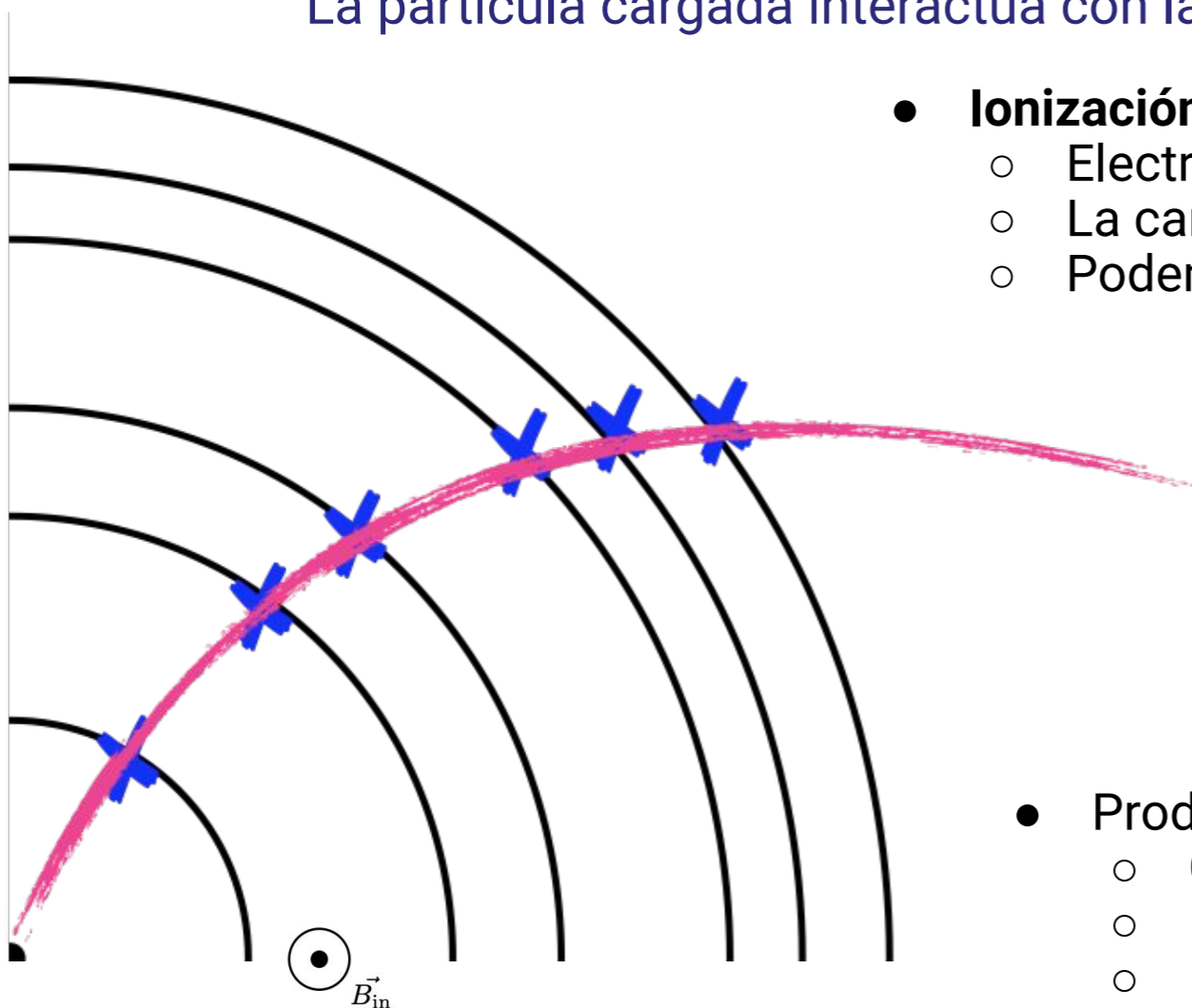


# ¿Cómo se generan los hits ?

- ¿Qué procesos de interacción de la **partícula-materia** debemos considerar?

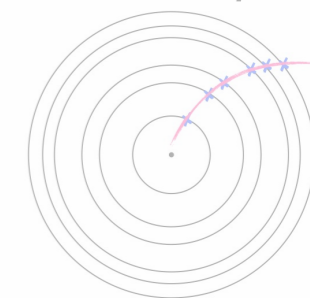
La partícula cargada interactúa con la materia

- **Ionización** (principal):
  - Electrones son arrancados del átomo.
  - La carga puede ser detectada.
  - Podemos medir por donde pasó la partícula (*hit*).



- Producción de **luz**:
  - Centelladores,
  - Radiación Cherenkov,
  - Radiación de transición.

Vista completa



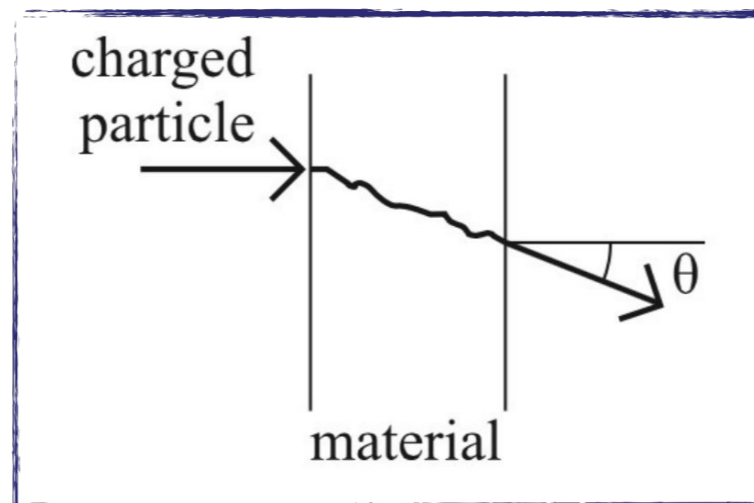


# ¿Cómo se generan los hits ?

- ¿Qué procesos de interacción de la **partícula-materia** debemos considerar?

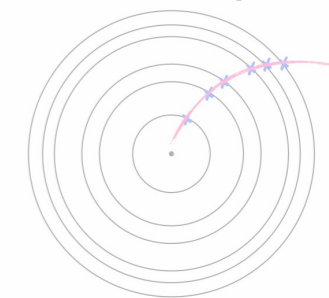
La partícula cargada es afectada por la interacción con la materia.

- **Multiple Coulomb Scattering** (dispersión múltiple):
  - deflexión en un ángulo relativamente pequeño (sin pérdida de energía)
  - Afecta la resolución de la medición de trayectorias.



- **Bremsstrahlung**
  - Afecta partículas ligeras: son aceleradas en la cercanía del núcleo, resultando en la emisión de un fotón (pérdida catastrófica de energía).

Vista completa





# ¿Cómo se generan los hits ?

- Existen 3 tecnologías de detectores principalmente usadas para *tracking*.

eg. Time Projection Chamber (TPC)  
Image by *O. Schäfer*

- Detectores gaseosos.
  - Proceso de ionización en el gas (pares electrón-ion),
  - se requiere una amplificación de la señal.
- Detectores de silicón.
  - Creación de pares electrón-hueco en materiales de estado sólido,
  - no se requiere amplificación.
- Trackers de fibras centelladoras.
  - luz centelladora se detecta con detectores de fotones (e.g. PMT).

